

УДК 623.004.67

В.А. Бородавка

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ЗНАЧЕНЬ СТРУМУ, НАПРУГИ ТА ПОТУЖНОСТІ

В статті розглянуті питання визначення точності вимірювання малих значень струму, напруги і потужності за допомогою термоелектричного компаратора з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці.

**Ключові слова:** термоелектричний компаратор, струм, напруга, потужність.

### Вступ

**Постановка задачі.** У електричних вимірюваннях, радіоелектроніці, магнітних вимірювань широке поширення набули прилади для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності. Використання в Збройних Силах України приладів для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності зумовило необхідність створення у складі пересувних лабораторій вимірювальної техніки апаратури щодо їх перевірки. Тому питання визначення точності вимірювання малих значень струму, напруги і потужності приладів для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності, є важливою науково-технічною задачею, актуальність якої підтверджується необхідністю, підвищення якості перевірки мікроамперметрів і мілівольтметрів з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці на зразках озброєння та військової техніки (ОВТ) Збройних Сил та інших військових формуваннях України для підтримання їх у боєздатному стані.

**Аналіз літератури.** У джерелі [1] розглядаються характеристики похибок вимірювань, форми подання, засоби використання зразків продукції при контролі їх параметрів. В літературі [2 – 4] визначено теоретичні та практичні відомості про засоби та методи обробки експериментальних даних при вимірюваннях. Нажаль, в цих роботах не проаналізовано питання визначення точності вимірювання малих значень струму, напруги і потужності приладів для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності.

**Метою статті** є визначення можливості проведення перевірки міліамперметрів, вольтметрів, ватметрів з необхідним запасом по точності на зразках озброєння та військової техніки (ОВТ) Збройних Сил та інших військових формуваннях України для підтримання їх у боєздатному стані за допомогою компаратора для мікроамперметрів і мілівольтметрів на змінному струмі з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же

значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці.

### Основний матеріал

Передача значень від еталонних заходів постійного струму приладам змінного струму здійснюється методом термоелектричного компарування. В настояній час існує установка з термоелектричним компаратором для мікроамперметрів і мілівольтметрів на змінному струмі при частотах до 200 кГц. При розробці універсальної установки постійного і змінного струму в її комплект була введена апаратура, що забезпечує перевірку міліампер метрів, вольтметрів і ватметрів в звуковому діапазоні частот з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці. На розробленій установці вказані прилади повіряють за допомогою термоелектричного компаратора типу КТЕМ-1. Компаратор виконаний за принципом різночасного порівняння. Його вимірювальний ланцюг за допомогою перемикача П 1 по черзі включають в ланцюзі змінного і регульованого постійного струмів. Про рівність значень цих струмів судять по рівності вихідних ТДЕС двох компарируючих термоперетворювачів. Наявність двох перетворювачів включених по мостовій схемі, обумовлено застосуванням сумарно - різницевого методу з подальшим квадратичним перетворенням, що здійснюється при вимірюванні потужності. При цьому виді вимірювання до вершин діагоналі, паралельно якій включений шунт підводять струм. Відомо, що при ідентичних і квадратичних характеристиках обох термоперетворювачів різниця вихідних ТДЕС є пропорційною потужності:

$$e = kUI \cos \varphi, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт перетворення;  $U$  і  $I$  – вимірювані напруга і струм;  $\varphi$  – кут зрушення фаз між струмом і напругою.

Компаратор можна використовувати також як датчик напруги при перевірці електронних мілі- і

мікрвольтметрів з малим власним споживанням. Для цього в ланцюг струму компаратора включають безреактивний резистор  $R_1$ , що калібрує спад напруги  $U$ , якій створюється на цьому резисторі відомим (зміряним) струмом  $I$  та подається на прилад, що повіряється. Значення напруги, без урахування вхідного опору вольтметра, що повіряється, визначають з виразу:

$$U = IR_1 \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2 / 2), \quad (2)$$

де  $R_1$  – опір резистора, що калібрується, на постійному струмі;  $\tau_1$  – його постійна часу;  $\omega$  – кутова частота. Відносна похибка визначення напруги  $\gamma_U$  при цьому має вигляд:

$$\gamma_U = (1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2 / 2) \cdot (\gamma_R + \gamma_I), \quad (3)$$

де  $\gamma_R$  і  $\gamma_I$  – відносні похибка вимірювання опору резистора, якій калібрується, і струму в ньому.

Для розширення меж вимірювання по струму в комплекті компаратора є набір резисторів, що калібруються, з набором шунтів. Похибка вимірювань за допомогою компараторів визначається похибками: переходу від постійного струму до змінного; вимірювання значення постійного струму, еквівалентного вимірюваному значенню змінного струму; від нечутливості нульового показника; похибками, обумовленими реактивністю елементів схеми і недоліками монтажу. Високу чутливість компаратора зумовлена специфікою вимірювання малих значень струму, напруги і потужності. Застосування повітряних багатоеlementних перетворювачів, які використовуються у відомих термоелектричних компараторах потужності належного ефекту не дає. Тому в компараторі були використані вакуумні термоперетворювачі. Нульовий показник обрано з урахуванням заданої похибки вимірювання (0,1%). Зв'язок між відносною похибкою вимірювання струму автокомпенсаційний і чутливістю нульового показника встановлює співвідношення:

$$\frac{p_1}{I} = \frac{p_a}{S_a S_{\text{кл}} I}, \quad (4)$$

де  $p_a$  – зміна відхилення показника, яку викликано зміною значення струму;  $S_a$  – чутливість нульового показника;  $S_{\text{кл}} = 2\text{кІ}$  – чутливість автокомпенсаційного перетворювача. Задаючись допустимою похибкою компарування (0,01%), значенням коефіцієнта комперирующего перетворювача для обраної робочої точці вольтамперної характеристики термоперетворювача і мінімальним значенням вимірюваного струму, визначаємо, що чутливість нульового показника повинна бути не менше  $5 \cdot 10^7$  дел/а. У даному компараторі в якості нульового показника

застосовується автокомпенсаційний мікрвольтнаоамперметр з фото зусиллям, чутливість якого  $S = 5 \cdot 10^7$  дел/а. Для зручності роботи при включенні компаратора в ланцюг установки в нього вбудована частина нульового показника з перемикачем чутливості та електричним коректором нуля, а вихідний прилад розташовано у вимірювальному стенді установки. Крім того, в компараторі передбачено можливість приєднання зовнішнього гальванометра у разі роботи поза ланцюгом пристрою. Режим роботи термоперетворювача в компараторі обраний таким чином, що в їх нагрівачах струми не перевищують  $0,1 \pm 0,2$  мА. Тому виявилось можливим не застосовувати спеціальні засоби для захисту термоперетворювача від перевантажень. Відносну похибку місткостей витoku визначимо з виразу:

$$\gamma_c = (I_k - I) / I \approx r_k \cdot \omega \cdot C_2, \quad (5)$$

де  $I_k$  і  $I$  – струм, що протікає через компаратор і прилад, якій повіряється;  $r_k$  – опір струмового ланцюга компаратора.

З підвищенням частоти відмінність в свідченнях приладу, що повіряється, і компаратора збільшуються. Для зменшення похибки від впливу витoku місткості термоперетворювача з резисторами ланцюга балансування по струму і напрузі поміщені в екран, завдяки чому було знизити місткість екрану щодо токоведущих частин до 12 пФ, а місткість сполучних провідників від затисків приєднання приладу, якій повіряється, до термоперетворювачів в компараторі складає близько 30 пФ.

Результат вимірювання на постійному струмі залежить від опору ізоляції. Відносна похибка витoku через опір ізоляції має вигляд:

$$\gamma_y^1 = (I_{\text{ізол}} / I_{\text{мін}}) \cdot 100 = (U_{\text{макс}} / R_{\text{ізол}}) (1 / I_{\text{мін}}) 100\%, \quad (6)$$

де  $I_{\text{ізол}}$  – струм витoku через ізоляцію;  $I_{\text{мін}}$  – мінімальний струм ланцюга;  $I_{\text{макс}}$  – максимальне падіння напруги в послідовному ланцюзі компаратора;  $R_{\text{ізол}}$  – опір ізоляції ланцюга.

При вимірюванні потужності до термоперетворювачам пред'являють ряд специфічних вимог, а саме: вони повинні мати ідентичні та квадратичні вольт-амперні характеристики. Реактивність ланцюгів в цьому випадку приводить до появи відносної кутової похибки. Оскільки неможливо вибрати два термоперетворювача з абсолютно ідентичними характеристиками, в компараторі передбачені змінні резистори, які служать для вирівнювання опорів плечей моста (балансування по напрузі), і резистори для поєднання вольт-амперних характеристик термоперетворювачей балансування по струму). Не-квадратичність вольтамперних характеристик цих

термоперетворювачей не повинна перевищувати 0,1%. Відносну кутову похибку компаратора потужності визначимо з виразу:

$$\gamma_{\varphi} = \cos \varphi_n - \cos \varphi_d / \cos \varphi_n = 1 - \cos(\gamma - \delta) + \operatorname{tg} \varphi \sin(\gamma - \delta), \quad (7)$$

де  $\varphi, \delta, \gamma$  – кути зрушення фаз;  $\varphi$  – між струмом  $I$  і напругою  $U$ ;  $\delta$  – струмом  $I_u$  напругою  $U$ ;  $\gamma$  – між струмом  $I_i$  і струмом  $I$ .

Ця похибка позначається тим більше, чим більше кут зрушення фаз  $\varphi$  між струмом і напругою. При  $\varphi = 0$  відносну кутову похибку визначають тільки як  $\cos(\gamma - \delta)$ , яка близький до одиниці.

Конструктивно компаратор є переносним приладом, на верхній панелі якого змонтовані затиски для приєднання приладів, що повіряються, і коаксіальні роз'єми для живлення ланцюгів компаратора змінним і постійним струмом. Для живлення ланцюгів струму і напруги компаратора застосовують спеціальні генератори і підсилювачі малої потужності, розраховані на роботу в діапазоні частот 40 Гц - 20 кГц. Коефіцієнт нелінійних спотворень при номінальному значенні вихідної потужності не перевищує 2%. Нестабільність вихідних параметрів підсилювачів не гірша  $\pm 0,05\%$  за 3 мін. Живляться анодні і накальні ланцюги підсилювачів від джерел живлення, що серійно випускаються.

Експериментально похибки компаратора оцінено при комплексній і поелементній повірці його для передбачених видів вимірювання.

Для оцінки похибки компарування струму і напруги в якості зразкового пристрою використовують термоелектричний компаратор, у якого похибка порівняння змінного струму (напруги) з постійним не перевищує  $\pm 0,1\%$  при частотах до 200 кГц. Тому похибка цієї установки в даному діапазоні 40 Гц – 20 кГц мала в порівнянні з очікуваною похибкою компаратора, якій має складнішу схему у зв'язку з можливістю зміни потужності. Щоб виявити характер зростання частотної похибки компаратора, його було випробувано в ширшому діапазоні частот.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

В.А. Бородавка

*В статье рассмотрены вопросы определения точности измерения малых значений тока, напряжения и мощности с помощью термоэлектрического компаратора с пределами измерения по току от 0,1 до 20 мА, по напряжению – от 0,2 до 2 В и по мощности – при тех же значениях тока и напряжения и коэффициента мощности, близкому к единице.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический компаратор, ток, напряжение, мощность.

#### DETERMINATION OF EXACTNESS OF MEASURING OF SMALL VALUES OF CURRENT, TENSION AND POWER

V.A. Borodavka

*In the articles the questions of determination of exactness of measuring of small values of current, tension and power are considered by thermo-electric comparator with the limits of measuring on a current from 0,1 to 20 mA, on tension – from 0,2 to 2 V and on power – at those values of current and tension and power-factor, to near to unit.*

**Keywords:** thermo-electric comparator, current, tension, power.

#### ВИСНОВКИ

1. За результатами випробувань встановлено, що частотна похибка при вимірюванні струму в діапазоні частот 60-20000 Гц не перевищують 0,1%, а при 60000 Гц складає 0,4%.

2. Експериментально доведено, що застосування окремих додаткових резисторів замість набору їх у вигляді магазину істотно зменшує похибку вимірювання напруги.

3. Для оцінки похибки компаратора при роботі в режимі калібратора напруг його було повірено поелементно. При цьому при використанні відомостей про похибку вимірювання струму, визначено похибку підгонки резистора, якій калібрується, і його залишкову реактивність.

4. Дійсні значення опорів резисторів, які калібруються, і значення їх постійних за часом вимірює за похибкою 0,05%.

5. Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що розглянутий компаратор може забезпечити повірку міліамперметрів, вольтметрів, ватметрів з необхідним запасом по точності на зразках озброєння та військової техніки (ОВТ) Збройних Силах та інших військових формуваннях України для підтримання їх у боездатному стані.

#### Список літератури

1. МИ 1317-86. ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. – М.: Изд-во стандартов. – 30 с.
2. Володарский Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз. – К.: Вица шк. Головне вид-во, 1987. – 280 с.
3. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.С. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
4. Беляев Б.М. Зразкові засоби вимірювань напруги і сили змінного струму, методи їх перевірки / Б.М. Беляев, М.Н. Фрідман. – К.: Видавництво стандартів, 1981. – 218 с.

Надійшла до редколегії 1.11.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.